

ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.4314/mcd.v14i1.1>

Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection

Tsiry D. Razafinarivo^I, Volatsara B. Rahetlah^{II}, Paulo Salgado^{III}, Neupomuscène J. Rakotozandriny^{IV}, José H. Andriarimalala^I, Iavo Ralainindriana^{IV}, Hélène Artus^{III}, Lionel Le Mezo^{III}

Correspondence:

Tsiririna D. Razafinarivo
Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA-DRZVP)
Antananarivo 101
Madagascar
Email: razafinarivotsiry@gmail.com

ABSTRACT

Cattle husbandry is a common activity practiced for several generations in Madagascar. Unfortunately, cattle farmers have not fully taken full advantage of the potentialities of this sector, mainly because of poor management of the available range lands and fodder resources. An improved cattle production could be achieved through the use of prediction tools integrating remote sensing data with modelling. Here, we present a novel tool developed to aid in husbandry management. We collected measurement field data related to fodder biomass and converted data obtained from remote sensing into fodder quantity. These data were used to program a multispectral SPOT 5 satellite to calculate correlations between the normalized difference vegetation index (NDVI) and the existing plant biomass. Using these correlations, we developed and tested several mathematic models to predict the quantity of biomass and the dry matter content. We developed a software, called 3C-BIOVIS, using computer programming and modelling of the obtained data. The tool predicts the quantity of available dry matter content within a defined rangeland and the number of animals that could be fed within a given time and space. It was designed to support rural development stakeholders in decision-making and to advise cattle farmers in forage resource management for an optimum output.

RÉSUMÉ

L'élevage de bovin est une activité pratiquée depuis de nombreuses générations à Madagascar. Malheureusement, les éleveurs n'ont pas su jusqu'à aujourd'hui, tirer pleinement profit des potentialités de ce secteur. La mauvaise gestion des parcours et des ressources fourragères représente une des principales

causes de cette faible performance. Ainsi, l'amélioration de la production bovine pourrait être obtenue à travers l'utilisation d'un outil de prédiction de la disponibilité des ressources fourragères en utilisant une approche combinée de modélisation et télédétection. Des mesures de données agronomiques de terrain sur la biomasse fourragère ont été effectuées pour convertir les données issues de la télédétection en quantités de biomasse fourragère. Cette approche a nécessité une programmation de passage du satellite multispectral SPOT 5 en parallèle avec l'acquisition de données de terrain pour calculer des corrélations entre l'indice de végétation (NDVI) et la biomasse végétale existante. À partir des régressions, plusieurs modèles ont été élaborés et testés pour pouvoir prédire la quantité de biomasse ainsi que la teneur en matière sèche. La programmation et la modélisation informatique ont permis de développer un logiciel "3C-BIOVIS". L'outil prédit les informations sur la quantité de matière sèche disponible au niveau des parcelles et le nombre d'animaux pouvant être alimentés par chaque parcelle à une période donnée et dans un espace déterminé, via les données obtenues des images satellites. Cet outil a été conçu pour aider les acteurs du développement rural à prendre des décisions de manière à conseiller les éleveurs sur la façon optimale de gérer les ressources fourragères.

INTRODUCTION

Madagascar est un pays caractérisé par de vastes zones de pâturages et de grandes variabilités spatio-temporelles quant aux précipitations. Ces variabilités font qu'il est délicat pour les éleveurs malgaches de tirer pleinement profit des ressources exploitables pour l'alimentation des ruminants. Cela affecte le

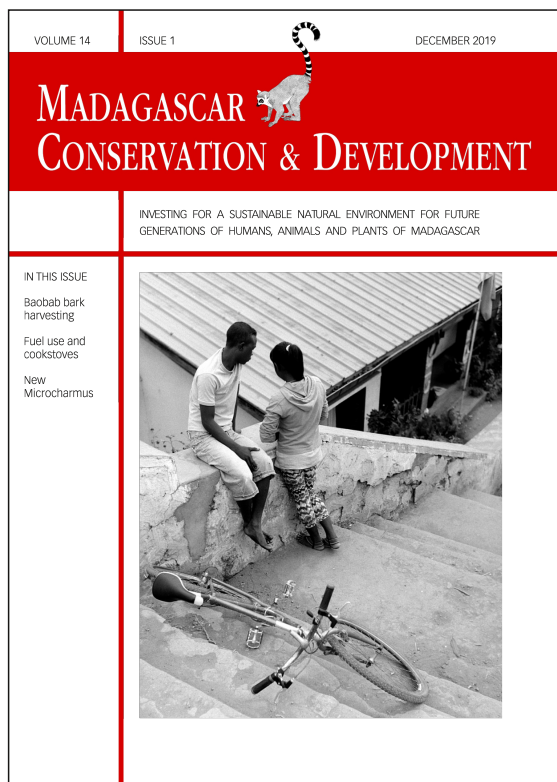
I Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural (FOFIFA-DRZV), Antananarivo 101, Madagascar

II FIFAMANOR, BP 198, Antsirabe 110, Madagascar

III CIRAD, UMR SELMET, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

IV École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

Citation Razafinarivo, T. D., Rahetlah, V. B., Salgado, P., Rakotozandriny, N. J., Andriarimalala, J. H., Ralainindriana, I., Artus, H., Le Mezo, L. 2019. Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection. Madagascar Conservation & Development 14, 1: 19–25. <http://dx.doi.org/10.4314/mcd.v14i1.1>



Madagascar Conservation & Development is the journal of Indian Ocean e-Ink. It is produced under the responsibility of this institution. The views expressed in contributions to MCD are solely those of the authors and not those of the journal editors or the publisher.

All the Issues and articles are freely available at <http://www.journalmcd.com>



Contact Journal MCD
info@journalmcd.net for general inquiries regarding MCD
funding@journalmcd.net to support the journal

Madagascar Conservation & Development
 Institute and Museum of Anthropology
 University of Zurich
 Winterthurerstrasse 190
 CH-8057 Zurich
 Switzerland



Indian Ocean e-Ink
 Promoting African Publishing and Education
www.ioeink.com



MISSOURI BOTANICAL GARDEN

Missouri Botanical Garden (MBG)
 Madagascar Research and Conservation Program
 BP 3391
 Antananarivo, 101, Madagascar

développement du pays, car une grande fraction de la population subsiste grâce à l'élevage. Le cheptel bovin, symbole national de la population, est devenu la référence de l'élevage malgache. En effet, il représente une valeur en capital estimée à 36 000 milliards d'Ariary (MGA), soit environ US\$ 1,8 milliards en 2014 (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). Par ailleurs, le zébu est utilisé dans les rituels des us et coutumes de la population et assure plusieurs fonctions socio-économiques. Dans certaines régions de l'île, l'importance du troupeau est une marque de prestige, une forme d'épargne et d'investissement (Ribot 1987, Kaufman 2008, Waeber et al. 2015). Les principaux atouts de la production de viande bovine sont sa qualité pour la boucherie et son faible coût de production, notamment grâce à une alimentation sur parcours basée sur des ressources naturelles renouvelables. Allant de pair avec la filière viande, la filière lait commence à se développer dans les activités d'élevage à Madagascar. En effet, elle apparaît comme l'une des filières animales présentant le potentiel de développement le plus élevé, avec une production annuelle estimée à plus de 100 millions de litres, toutes races confondues. La filière lait représente une valeur de 100 milliards de MGA (environ US\$ 50 millions en 2014) (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). La production bovine actuelle est cependant encore loin du potentiel de production de l'élevage malgache. Cette faible production est généralement liée au déficit alimentaire du cheptel, surtout durant la saison sèche, pendant laquelle les éleveurs sont confrontés à un déséquilibre entre la demande et la disponibilité en fourrage aussi bien en quantité qu'en qualité. Pourtant, Madagascar dispose encore de grandes surfaces de terrain exploitable pour l'alimentation des ruminants. Une estimation de la distribution des ressources fourragères des grandes étendues éloignées reste toutefois difficile et complexe (Coughenour et Makkar 2014). La production des ruminants pourrait ainsi être améliorée par la mise en place d'un outil fonctionnel pour la gestion à grande échelle de ces ressources en utilisant des imageries satellitaires.

Cet article est destiné à présenter l'outil dénommé 3C-BIOVIS qui a été développé pour aider à la gestion des ressources fourragères par une approche de modélisation et de télédétection. Cet outil fournit des données quantifiables sur la disponibilité des ressources, pour une prise de décision optimale sur l'utilisation des parcelles et parcours fourragers. Il permet aussi de définir la quantité de fourrage vert pour alimenter le cheptel durant les saisons pluvieuses ainsi que le surplus de fourrage qui sera conservé pour les saisons sèches sous forme de foin ou d'ensilage. Ainsi, à chaque acquisition d'une image satellite, il serait possible de gérer et d'ajuster le troupeau, ainsi que son alimentation, en fonction de la disponibilité des fourrages au niveau de l'exploitation ou au niveau territorial.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

PRÉSENTATION DE L'OUTIL. Le sigle 3C-BIOVIS correspond à « Calculateur de la Capacité de Charge, et de la BIOmasse Végétale par Imagerie Satellite ». Il s'agit d'un outil de calcul qui permet de déterminer la quantité des ressources fourragères à partir des données obtenues par traitements d'images satellites. Le noyau de cet outil est configuré à partir de l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI) (Rouse et al. 1974) qui est fortement corrélé avec la densité du couvert végétal. Ainsi, les utilisateurs de ce logiciel doivent avoir des notions de base en traitement d'image satellitaire, comme l'extraction de NDVI à l'aide de logiciels tels les Systèmes d'Information Géographique comme QGIS, pour pouvoir

utiliser cet outil. Le logiciel 3C-BIOVIS est un modèle indicatif qui contient trois sous-modèles intégrés, à savoir le calcul de la quantité de biomasses, la teneur en matière sèche (MS) et la capacité de charge liée à la classe animale et l'espèce fourragère. Cet outil fournit des informations en temps réel sur la quantité de ressources fourragères ainsi que le nombre d'animaux pouvant être alimentés durant une année sur une parcelle géo-localisée dans une image satellite (Hervé et al. 1989). Un système d'alerte par feu tricolore permet une aide à la décision des utilisateurs du logiciel sur une éventuelle réorganisation de la gestion de l'exploitation ou du pâturage suivant la disponibilité des ressources. La couleur rouge indique un surpâturage de la parcelle. Cela signifie que la production prédite est inférieure à 1,5 tonnes de MS/ha et qu'il est indispensable pour les éleveurs d'arrêter l'exploitation de la parcelle. À l'inverse de cette surexploitation, l'outil indique une coloration verte qui désigne une production de biomasse supérieure à 3,5 tonnes de MS/ha, qui pourrait conduire à un gaspillage des ressources (Barbet-Massin et al. 2004). Entre ces deux couleurs se trouve l'orange qui indique qu'il y a assez de biomasse pour alimenter le cheptel. Par conséquent, cet outil permet d'apporter conseil aux exploitants sur la gestion et/ou la mobilité de leurs troupeaux par rapport à la disponibilité des ressources (itinéraire des parcours, charge animale). Un système de saisi des données (NDVI, date de l'acquisition de l'image satellite, coordonnées GSP, taille de la parcelle, estimation du pourcentage d'utilisation de la parcelle par l'animal, type d'animal) avec une interface facile à utiliser (Figure 1) a été élaboré donnant accès direct aux informations exploitables, sur les fourrages disponibles dans les bases de données du logiciel. Toutefois, des options supplémentaires ont été introduites, comme la possibilité d'utiliser le logiciel sans avoir accès aux données satellitaires, mais par des mesures directes sur le terrain à l'aide d'une placette de 1m². Cette option « mesure directe » a été utilisée pour tester la fiabilité de l'outil, tout en considérant les intervalles de confiance, vu les hétérogénéités intra-pixel de la biomasse. Une autre option disponible est la possibilité d'utiliser l'outil pour d'autres espèces de ruminants (ovins et caprins) par des coefficients d'équivalence en fonction de leur consommation en aliments grossiers. Le logiciel 3C-BIOVIS est principalement conçu pour les acteurs du développement rural comme les techniciens de l'élevage, mais d'autres acteurs peuvent l'utiliser comme les coopératives d'éleveurs, les ONG, les ministères, les établissements d'enseignement ou de recherche.

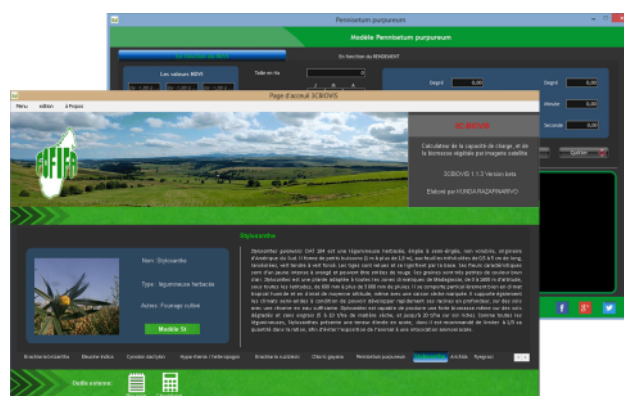


Figure 1. Interface du logiciel 3C-BIOVIS.
<https://www.dp-spad.org/projets/acheves/biova/>
<http://www.cirad.mg/c3biovis/>

ZONES D'ÉTUDE. L'outil a été calibré sur deux zones clés de l'élevage de bovin à Madagascar, à savoir les régions du Vakinankaratra et du Bongolava (Figure 2) ; ces régions représentent les deux tiers du triangle laitier malgache (Rakotozandrindrainy et al. 2004). La région du Vakinankaratra, située sur les Hautes Terres de Madagascar (18°59' S et 47°19' E), produit plus de 70% de la production laitière nationale (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche 2004). De ce fait, la plupart des éleveurs cultivent des fourrages durant toute l'année pour alimenter leur cheptel. Le climat tempéré d'altitude dans cette région entraîne une forte saisonnalité dans la production des espèces fourragères tropicales et une dominance des espèces tempérées (Marcel 1986). L'optimum de température pour la photosynthèse des espèces fourragères tempérées est compris entre 10 et 25°C (Murata et al. 1965), qui sont des températures caractéristiques de cette région. Dans cette partie de l'île, les espèces tempérées comme le ray-grass, l'avoine ou l'orge, sont généralement plantées en contre-saison dans les bas-fonds en rotation avec la riziculture (Mouret 2012). Les données agronomiques portant sur les fourrages usuellement utilisés en saison sèche ont donc été mesurées dans cette zone.

La région du Bongolava, située dans le Moyen Ouest de Madagascar vers E046° 02', S18° 44' (Figure 2) a la réputation d'être plutôt orientée vers l'élevage extensif de zébus. La région assure les deux tiers de l'approvisionnement en viande bovine de la capitale par le marché de Tsiroanomandidy (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). Dans cette zone, les cultures de fourrage en contre-saison sont moins pratiquées (Razafindrakoto 2010). Cependant, il existe de grandes surfaces de pâturage naturel pour alimenter les bovins, y compris les animaux en transhumance. La région est caractérisée par un climat tropical à deux saisons distinctes (sèche et pluvieuse). La température moyenne est de 30°C (Razafindrakoto 2010) qui représente l'optimum pour la photosynthèse des espèces tropicales comme *Cynodon dacty-*

lon, *Pennisetum purpureum* et *Brachiaria brizantha* (Jolliffe et al. 1968, Archimède 2009).

CALIBRATION DU MODÈLE DE RENDEMENT DE LA BIOMASSE FOURRAGÈRE. La calibration consiste à élaborer des modèles prédictifs de la quantité de biomasses par des régressions statistiques entre les valeurs de NDVI obtenues d'une série temporelle d'images SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) et de rendements mesurés sur le terrain. 428 prélèvements de biomasses aériennes ont été effectués sur des placettes de 1m² (Guérif et al. 2008), dans les zones d'étude pour paramétrer et calibrer les modèles. Les observations portaient sur la hauteur des différentes espèces fourragères et leur rendement en matière verte. Les sites ont été sélectionnés avec (i) une taille suffisamment grande et (ii) une homogénéité des composants afin de réduire les effets d'erreurs entre les observations sur le terrain et par télédétection. Le seuil minimal de la dimension des parcelles a été fixé à 1600m², et le nombre de points de prélèvement a été défini selon la surface des parcelles. Sur chaque point, seule l'espèce majoritaire dans la placette a été considérée pour la calibration, et un prélèvement GPS a été effectué pour la géolocalisation des points. Ces procédés ont été répétés tous les 15 jours durant plusieurs mois (6 mois x 3) pour pouvoir suivre l'évolution des différents stades de développement de chaque espèce. Parallèlement, une programmation pour l'acquisition d'images satellites a été effectuée par la station de réception et de traitement d'images satellites SEAS-OI sise à la Réunion. Des Indices de Végétation Différentiels Normalisés (NDVI) ont été calculés à partir des images satellites multispectrales SPOT 5 de 10 m de résolution, acquises sur un pas de temps de 10 jours, en parallèle avec les prélèvements sur le terrain. L'indice de végétation correspond à la valeur de réflectance du vert qui est fortement corrélée avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse (Meneses-Tovar 2011). Dans le domaine spectral, la végétation chlorophyllienne a toujours des valeurs de réflectance plus fortes que les autres éléments (sols, eau, minéraux). Ainsi, différentes relations de régression ont pu être calculées entre les données agronomiques caractérisant chaque type de végétation et les données spatiales (NDVI), pour obtenir des modèles de prédiction (Figure 3).

CALIBRATION DU MODÈLE DE MATIÈRE SÈCHE. À chaque mesure du rendement fourrager sur le terrain, un échantillonnage de la biomasse des différents types de fourrages, en utilisant la méthode des placettes de 1m², a été effectué le long d'un transect pour réaliser les analyses de matière sèche au laboratoire. Le poids sec total des plantes a été déterminé selon les techniques standardisées de séchage à l'étuve à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant (Dulphy et al. 1975). Ces poids ont alors été multipliés par le facteur approprié en relation avec la taille du quadrat afin de les convertir en kg/ha. Les différentes teneurs en matière sèche dans le temps sont par la suite couplés puis corrélés avec la valeur du NDVI pour obtenir un ensemble de données sur la productivité en matière sèche à partir des données satellites et de la date de prise de l'image. Un modèle de prédiction de la variation temporelle de la teneur en matière sèche en fonction de la valeur de NDVI a été calibré. Ce deuxième modèle couplé au premier donnera, à partir d'une image satellite, la teneur moyenne en matière sèche d'une parcelle déterminée à une période déterminée. Par conséquent, connaissant la surface

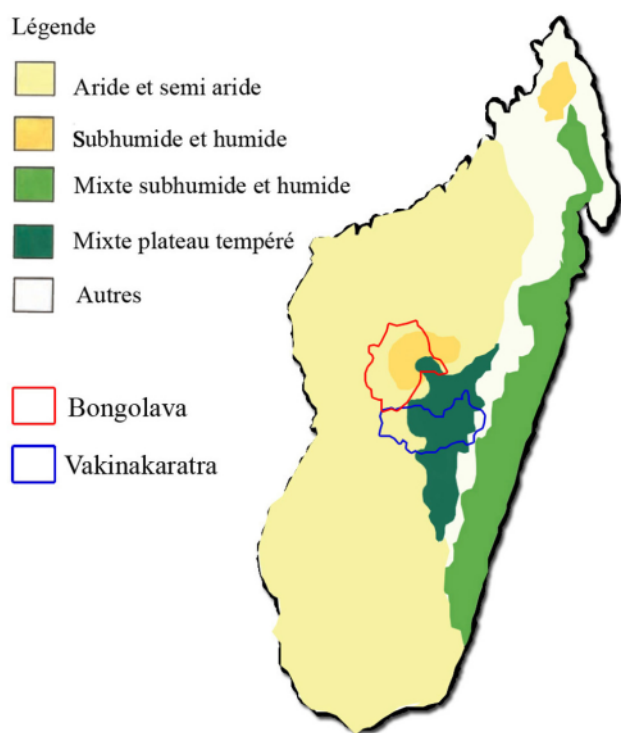


Figure 2. Répartition spatiale des zones pastorales à Madagascar (modifié d'après Vall et al. 2014)

de la parcelle, il sera possible de définir la capacité de charge animale de chaque parcelle suivant la capacité d'ingestion de matière sèche par les ruminants.

CALCUL DE LA CAPACITÉ DE CHARGE. La capacité de charge animale est un indicateur important pour exploiter les parcelles de façon rationnelle. La capacité de charge correspond au nombre d'animaux, en unité bovin tropical (UBT) ou par unité gros bétail (UGB), par unité de surface en hectares (Hervé et al. 1989). Elle dépend de la production annuelle du fourrage (kg de MS/ha), de la capacité d'ingestion du ruminant et de la durée d'exploitation du fourrage au cours de l'année. La notion de capacité de charge animale présente l'avantage de donner un ordre de

grandeur du nombre d'animaux susceptibles d'être alimentés sur les parcelles, dans les limites raisonnables d'une exploitation ménagant à peu près les productions à venir. La quantité de fourrage obtenue à partir des précédents modèles est paramétrée pour caractériser la densité du bétail en fonction du taux d'ingestion de matière sèche pour chaque bovin. La production totale annuelle de certains fourrages a été déterminée par une culture mise en défend dans des enclos ; lorsqu'il n'a pas été possible d'effectuer cette pratique, les données ont été récupérées à partir de la littérature.

MODÉLISATION ET PROGRAMMATION. Toutes les données ont été programmées et modélisées sous un langage métier dénommé WLanguage (Vandeveld 2014) de manière à ce qu'à partir de variables d'entrées basiques, il soit possible d'obtenir des informations poussées sur la disponibilité des ressources. WLanguage est un langage de programmation de quatrième génération exploitable dans des outils de développement informatique tel que WinDev. Cette version test du logiciel 3C-BIOVIS n'est exécutable que par un système d'exploitation Windows. WLanguage contient des fonctions de haut niveau, qui permettent l'affectation du contenu des champs d'une fenêtre, c'est-à-dire les données d'entrées, vers les modèles stockés dans les bases de données pour ressortir ensuite les résultats des calculs. Une fois que les variables d'entrées (Tableau S1) sont saisies dans l'outil, tout le système subit un changement considérable pour faire calculer les différents indicateurs de la parcelle (Variables de sortie, Tableau S1). Ces variables d'entrées sont totalement indépendantes des autres variables. À l'opposé, les variables de sortie ont un rôle mineur dans le processus, mais elles sont les plus importantes, car elles fournissent les informations recherchées dont la productivité de la parcelle, la capacité de charge et l'indicateur traduisant la pression animale. Entre ces deux types de variables se trouvent les variables d'état, qui sont les générateurs du processus de calcul dans le logiciel.

VALIDATION DE L'OUTIL. La validation de l'outil a consisté à confronter les valeurs de biomasse mesurées sur le terrain dans les placettes aux valeurs prédites par l'outil. Cela désigne un processus qui permet de tester la précision prédictive d'un modèle dans un échantillon test par rapport à la précision prédictive de l'échantillon d'apprentissage à partir duquel le modèle a été développé. Dans ce cas, toutes les valeurs mesurées sur le terrain ont été employées pour cette validation par la technique de la validation croisée « leave-one-out », à savoir en supprimer un, ou « cross-validation », à savoir validation croisée (Holden et al. 1996). Pour ce faire, toutes les composantes de l'échantillon « n » (n = 428) original ont été divisées en « n » échantillons, puis, un des « n » échantillons a été sélectionné comme ensemble de validation et les « n-1 » autres échantillons constituaient l'ensemble d'apprentissage. L'erreur quadratique moyenne a été calculée pour donner le score de performance du modèle sur l'échantillon test. Cette opération a été répétée en sélectionnant un autre échantillon de validation parmi les « n-1 » échantillons qui n'avaient pas encore été utilisés pour la validation du modèle. L'opération a ainsi été répétée « n » fois pour qu'en fin de compte chaque sous-échantillon aura été utilisé exactement une fois comme ensemble de validation. La moyenne des « n » erreurs quadratiques moyennes a finalement été calculée pour estimer l'erreur de prédiction.

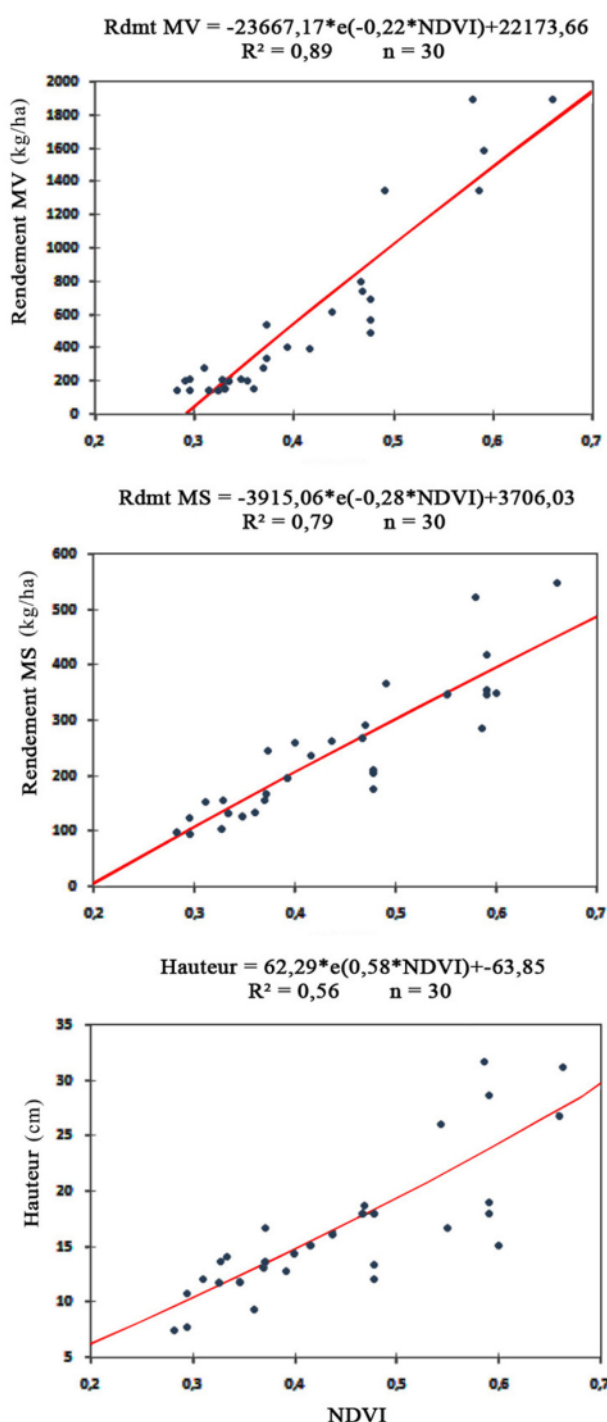


Figure 3. Représentations graphiques des régressions entre les données agronomiques et les valeurs de NDVI pour *Digitaria*.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

RELATION ENTRE L'INDICE NDVI ET LE RENDEMENT DES DIFFÉRENTES ESPÈCES FOURRAGÈRES. Lorsque la végétation est étudiée par télédétection, les variations de la réflectance mesurées au niveau d'un capteur satellitaire sont liées aux propriétés optiques de la biomasse végétale, mais également à la structure de la végétation et au taux de recouvrement du sol. Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols (Nesrine 2015). Il y a donc une grande différence entre la calibration des parcelles fourragères naturelles et celles qui sont cultivées. Il est généralement plus difficile d'avoir une bonne corrélation pour les parcours et les pâturages naturels. Néanmoins, dans les deux cas, les valeurs de NDVI présentaient toujours une forte corrélation avec la densité du couvert végétal (Figure 3). Durant les différentes calibrations, les modèles exponentiels ont donné de meilleurs résultats par rapport aux modèles linéaires. Certains auteurs suggèrent une relation non linéaire entre NDVI et quantité de biomasse (Tucker et al. 1985, Santin-Janin et al. 2009). Les coefficients de détermination entre NDVI et le rendement de biomasse végétal sont meilleurs pour les parcelles cultivées. Cependant, les parcours naturels sont moins uniformes du fait de l'envahissement par d'autres espèces d'adventices. De plus, les indices de végétation sont également sensibles à la réflectance du sol sous-jacent (Moussa 2005). Ainsi, les coefficients de détermination sont moins bons pour ces pâturages naturels. En moyenne, 70% des variabilités des mesures directes sur le terrain sont expliquées par les modèles internes du logiciel à partir des données obtenues par imagerie satellitaire. Pour le reste, soit le logiciel sous-estime, soit il surestime, mais en général, les calculs se font dans l'ensemble en prenant en considération la totalité des pixels existant au niveau de la parcelle. La figure 4 représente graphiquement le nuage de points des valeurs réelles sur le terrain, du rendement en MV (tonnes/ha) des différentes espèces par rapport aux valeurs prédites MV (tonnes/ha) par le logiciel. Le nuage de points affiche la ligne qui illustre la prédiction parfaite, où la valeur prédite correspond exactement à la valeur réelle. La distance d'un point par rapport à cette ligne à un angle idéal de 45 degrés indique le niveau d'exactitude ou d'inexactitude de la prédiction. Ainsi, les résultats issus du logiciel confirment les capacités des données satellitaires à fournir des estimations de la productivité des fourrages (Le Mézo 2012). Les modèles de l'outil s'exécutent aussi bien sur l'échantillon test que sur l'échantillon d'apprentissage durant la validation croisée.

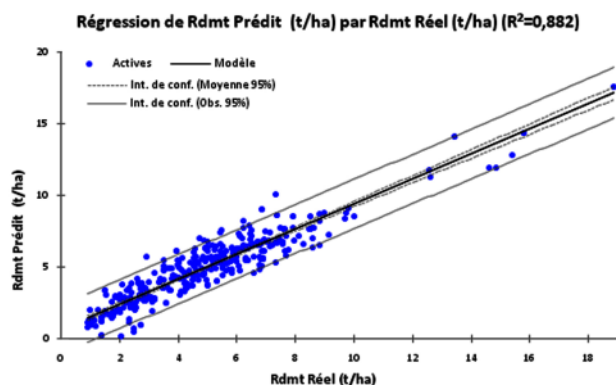


Figure 4. Nuage de points des valeurs réelles du rendement des différentes espèces par rapport aux valeurs prédites par le logiciel.

VARIABLES DE SORTIE. Le logiciel calcule le rendement fourrager moyen ainsi que la teneur en matière sèche du fourrage déterminée à la date de la prise de l'image satellitaire. Ces données ont été traitées par l'outil pour calculer la quantité de fourrage total disponible pour le bétail à cette date, mais aussi la capacité de charge optimale de la parcelle. Des coefficients de conversion ont donné des informations sur le nombre maximum d'herbivores, selon leur type (espèce animale, taille), pouvant pâturer la surface de la parcelle sans détérioration de la végétation. Les utilisateurs de l'outil peuvent ainsi équilibrer la quantité ingérée par les animaux, la productivité en matières sèches de la végétation, la gestion à long terme du pâturage et les coûts de production (Klein et al. 2014). Toutes ces données sont géolocalisées en degré décimal pour faciliter l'introduction des données dans les logiciels courants en système d'information géographique. Ainsi, il sera désormais possible de réaliser des cartes de disponibilité des ressources fourragères. Les cartes de biomasse pourraient potentiellement être utilisées à plusieurs fins comme dans la gestion de troupeaux ainsi que leur affouragement en fonction de la disponibilité des ressources au niveau de l'exploitation et/ou au niveau du territoire. Mais d'autres fonctions peuvent être envisagées ; il a été démontré que ces cartes pouvaient être utilisées pour planifier les feux contrôlés dans la gestion de pâturage (Holechek et al. 1995). La quantité de biomasse utilisée comme combustible doit atteindre au moins 1500kg/ha pour que le feu se propage (Trollope et al. 1986). Des perspectives de développement de l'élevage à Madagascar peuvent être envisagées, comme en Afrique du Sud, sur la diffusion de cartes de disponibilité végétale rapportées tous les 10 jours au niveau des ministères et des districts agricoles (Coughenour et Makkar 2014). Par conséquent, il serait possible de profiter au maximum de la disponibilité des ressources, comme dans la gestion de pâturage, pour déterminer l'instant propice de la mise à l'herbe ou de la sortie d'herbe durant une saison déterminée. Durant cette étude, la calibration du logiciel a été effectuée à partir du satellite SPOT 5, mais rien n'empêche une adaptation à d'autres satellites (par exemple, Sentinel2) qui pourraient fournir les valeurs de NDVI. Cependant, quel que soit le satellite utilisé, certains paramètres devraient être considérés lors de l'utilisation de l'outil comme : (i) l'allure générale de la prairie qui ne doit pas être trop dégradée, c'est-à-dire que l'offre fourragère ne devrait pas être trop limitée par l'envahissement des adventices ou l'apparition de zones nues ; (ii) une variation saisonnière prononcée (par exemple, le prolongement de la saison sèche) pourrait affecter la teneur en matière sèche prédite par le logiciel. Par ailleurs, le logiciel est doté d'un système de partage en ligne des résultats, relié directement à l'adresse de l'auteur. Ce système prendra en compte les évaluations, ainsi que les contributions des utilisateurs du logiciel pour une éventuelle perspective d'évaluation ultérieure des ressources fourragères à l'échelle nationale.

CONCLUSION

L'élevage bovin est un secteur qui présente un grand potentiel dans le développement de Madagascar. Cependant, plusieurs manques à gagner subsistent encore dans ce domaine dû à une mauvaise gestion des ressources alimentaires. Le présent article présente les différentes étapes de développement d'un logiciel appelé « 3C-BIOVIS » qui permet la prédiction du rendement des ressources fourragères par l'utilisation combinée de modèles de prédiction et de la télédétection. Le logiciel a été calibré à partir

des modèles résultants des régressions entre les données agronomiques mesurées au sol et les indices de végétation (NDVI) obtenus par imagerie satellitaire. Les régressions donnent une moyenne des coefficients de détermination (R^2) d'environ 0,7. Le logiciel fournit la quantité ponctuelle de biomasses sur chaque parcelle étudiée. Un système d'alerte, en feu tricolore offre une aide aux utilisateurs pour une éventuelle prise de décision sur la gestion des ressources fourragères. Il devient possible à partir de cet outil d'affirmer que les indices de végétation peuvent être utilisés pour la détermination de capacité de charge animale et de l'état de valorisation des parcelles de pâturage. Ce logiciel représente une grande innovation dans les systèmes d'élevage malgache pour la gestion des ressources fourragères à une échelle territoriale. Il sera possible de profiter au maximum de la disponibilité des ressources pour une plus grande contribution de l'élevage dans le développement du pays. Des perspectives sont déjà envisagées comme la conception mensuelle d'une carte de disponibilité des ressources dans les zones clés de l'élevage malgache. Il serait recommandable d'élargir le travail à d'autres espèces végétales et de les introduire dans les bases de données du logiciel. Ou encore, l'inventaire à l'échelle nationale des ressources disponibles dans l'outil pour une évaluation prospective de la situation fourragère.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le projet BIOVA aux appuis techniques et financiers pour la réalisation de cet article.

RÉFÉRENCES

- Andriarimalala, H. J. 2014. Étude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité par télédétection. Unpubl. MS thesis, Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques. Département Élevage. Disponible en ligne <<http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/andriarimalalaHerilalaoJ_AGRO_M2_14.pdf>>
- Archimède, H., Sauviant, D., Assoumaya, C., Fanchone, A. et Boval, M. 2009. Fourrages tropicaux : Valeur alimentaire comparée aux fourrages tempérés et évaluation au pâturage. *Rencontres Recherches Ruminants* 16: 17–24. Disponible en ligne <http://journees3r.fr/IMG/pdf/2009_01_01_Archimede.pdf>
- Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A. et Thomas, P. 2004. Guide Technique pour la Création, la Gestion et la Valorisation des Prairies à la Réunion. Disponible en ligne <http://publications.cirad.fr/une_notion.php?dk=522332>
- Bolton, J. K. & Brown, R. H. 1980. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways: V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milioides*, and tall fescue (*Festuca arundinacea*) to nitrogen nutrition. *Plant Physiology* 66, 1: 9–100. <<https://doi.org/10.1104/pp.66.1.97>>
- Boudet, G. 1975. Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un pâturage naturel tropical. In: *Inventaire et Cartographie des Pâturages Tropicaux Africains*, Actes du Colloque de Bamako, Mali (3–8 mars 1975), pp 265–267. Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, Maison-Alfort, France. Disponible en ligne <<http://bit.ly/2H5Q2XS>>
- Coughenour, M. B. et Makkar, H. P. S. 2014. La conduite d'évaluations nationales des aliments pour animaux. Manuel de Production et de santé animale FAO N. 15. Rome, Italie. Disponible en ligne <<http://bit.ly/2l3xb0Y>>
- Dulphy, J. P., Demarquilly, C., Henry, M., Jailler M. et Jamot, J. 1975. Perte de composés volatils lors de la détermination à l'étuve de la teneur en matière sèche des ensilages. *Annales de Zootechnie* 24, 4: 743–756. Disponible en ligne <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00887512/document>>
- Guérif, M. et Seguin, B. 1991. Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT: Résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue. *Séminaire Méditerranéens* 4: 115–127. Disponible en ligne <<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=C1911187>>
- Hervé, D. et Genin D. 1998. Capacité de charge animale ou indicateur de pression sur des ressources fourragères. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, pp.38–49. Disponible en ligne <<http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010013720>>
- Holden, S. B. 1996. Cross-validation and the PAC Learning Model. Research Note RN/96/64, Department of CS, University College, London. Disponible en ligne <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=238067>>
- Holecck, J. L., Pieper, R. D. & Herbel, C. H. 1995. Range Management: Principles and Practices, Second edition. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Jolliffe, P. A. & Tregunna, E. B. 1968. Effect of temperature, CO₂ concentration, and light intensity on oxygen inhibition of photosynthesis in wheat leaves. *Plant physiology* 43, 6: 902–906. <<https://doi.org/10.1104/pp.43.6.902>>
- Kaufmann, J. C. 2008. The non-modern constitution of famines in Madagascar's spiny forests: "water-food" plants, cattle and Mahafale landscape praxis. *Environmental Sciences* 5, 2: 73–89. <<https://doi.org/10.1080/15693430801912162>>
- Klein, H.-D., Rippstein, G., Huguenin J., Guerin, H., Toutain, B. et Louppe, D. 2014. Les Cultures Fourragères. Editions Quae, Versailles, France.
- Le Mézo, L. 2012. Caractérisation de la ressource fourragère des prairies cultivées de la Réunion par image satellite. Ph.D. thesis. Agronomie Production Végétale Environnement, VetAgro Sup, CIRAD. Disponible en ligne <<https://bit.ly/2pml6uD>>
- Marcel, A. 1986. Capacité oxydative et résistance à la sécheresse de différentes plantes supérieures CAM-C3-C4 et de végétaux inférieurs. *Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques* 133, 3: 207–212. <<http://dx.doi.org/10.1080/01811797.1986.10824702>>
- Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche 2004. Filières et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche : Filière Lait. Fiche N. 202. Disponible en ligne <http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf/_202_Filiere_Lait.pdf>
- Ministère de l'Élevage à Madagascar. 2014. Statistiques des Cheptels à Madagascar. Rapport de la Direction des Ressources Animales. Disponible en ligne <<http://www.mpa.gov.mg/donnees/statistique/>>
- Meneses-Tovar, C. L., 2011. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva* 62, 2: 39–46. Disponible en ligne <<http://www.fao.org/3/i2560f/i2560f07.pdf>>
- Mouret, P. 2012. Évaluation participative des stratégies d'évolution d'exploitations laitières dans la région Vakinankaratra - Madagascar. Mémoire d'ingénieur, Productions et innovations dans les systèmes techniques végétaux. AgroParisTech, Paris. Disponible en ligne <<http://agritrop.cirad.fr/570246/>>
- Moussa, M. M. 2005. Application des Méthodes d'Évaluation de Rendements Agricoles à l'Aide des Images NDVI. Centre régional Agrhymet, Rapport de consultation, Niamey-Niger. Disponible en ligne <<https://bit.ly/2mtmgUw>>
- Murata, Y., Iyama, J. & Honma, T. 1965. Studies on the photosynthesis of forage crops. IV. Influence of air-temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern type forage crops. *Japanese Journal of Crop Science* 34, 2: 154–158. <<https://doi.org/10.1626/jcs.34.154>>
- Nesrine, C. 2015. Méthodes de classification pour la cartographie de l'occupation du sol, Journée Etats de surface pour la spatialisation, Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens. Ecole d'Hiver, ENSEGD Bordeaux-INP. Disponible en ligne <<https://bit.ly/2NtUd09>>
- Rahetlah, V. B., Salgado, P., Andrianarisoa, B., Tillard, E., Razafindrazaka, H., Le Mezo, L. & Ramalanjaona, V. L. 2014. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock Research for Rural Development* 26, 5: #95. <<http://www.lrrd.org/lrrd26/5/rahe26095.html>>
- Rakotozandrindrainy, R., Razafindrajaona, J. M. et Foucras, G. 2007. Diagnostic rapide à la ferme des mammites subcliniques des vaches laitières du triangle laitier des hautes terres de Madagascar. *Revue de Médecine Vétérinaire* 158, 2: 100–105.
- Razafindrakoto, H. A., 2010. Le dynamisme de l'élevage bovin dans la commune urbaine de Tsiroanomandidy, capitale du Bongolava. Unpubl. MS thesis. Université d'Antananarivo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Disponible en ligne <<https://bit.ly/2MMkQPY>>

- Ribot, J. J. 1982. Les comportements de l'éleveur et du zébu à Madagascar : l'adaptation du rôle et des actions du service de l'élevage à ces comportements. *Terre Malgache. Tany Malagasy* 21: 125–136. Disponible en ligne <<https://bit.ly/2Dchru7>>
- Rouse Jr., J. W., Hass, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp. 1*, A: 309–317. Disponible en ligne <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022614>
- Santin-Janin, H., Garel, M., Chapuis, J. L. & Pontier, D. 2009. Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago. *Polar Biology* 32, 6: 861–871. <<https://doi.org/10.1007/s00300-009-0586-5>>
- Vall, E., Salgado, P., Corniaux, C., Blanchard, M., Dutilly, C. & Alary, V. 2014. Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique. *INRA Productions Animales* 27, 2: 161–174.
- Waeber, P. O., Wilmé, L., Ramamonjisoa, B., Garcia, C., Rakotomalala, D., et al. 2015. Dry forests in Madagascar, neglected and under pressure. *International Forestry Review* 17, S2: 127–148. <<http://dx.doi.org/10.1505/146554815815834822>>

MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

Disponible en ligne uniquement

Tableau S1. Modèles et variables du Logiciel 3C-BIOVIS.

Table S1. Modèles et variables du Logiciel 3C-BIOVIS. ((a) : d'après Rahetlah et al. 2014 ; (b) : d'après Andriamanlala 2014 ; (c) : d'après Boudet 1975))

VARIABLES D'ENTRÉES	VARIABLES D'ÉTAT						VARIABLES DE SORTIE
Date de l'image satellite	Nom de l'espèce	n	Modèle Rendement MV	R ²	Modèle rendement MS	R ²	Rendement en MV (t/ha)
	<i>Brachiaria brizantha</i>	169	MV = -4603,53* $e^{-0,29NDVI} + 4565,65$	0.64	%MS = 215,04* $e^{-5,57NDVI} + 34,82$	0.52	Hauteur (cm)
Coordonnées GSP (gradient)	<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	70	MV = -3119,1* $e^{-0,2NDVI} + 3201,76$	0.59	%MS = 568,49* $e^{-8,12NDVI} + 35,12$	0.79	Quantité de MV disponible (t)
	<i>Eleusine indica</i>	30	MV = -23667,18* $e^{-0,22NDVI} + 22173,66$	0.89	MS = -3915,06* $e^{-0,28NDVI} + 3706,03$	0.79	Teneur en MS (%)
Taille de la parcelle (ha)	<i>Cynodon dactylon</i>	48	MV = -23070,21* $e^{-0,12NDVI} + 22506,82$	0.79	MS = -5396,68* $e^{-0,098NDVI} + 5405,97$	0.73	Rendement en MS (t/ha)
	<i>Aristida multicaulis</i>	12	MV = -187774,42* $e^{-19,75NDVI} + 641,31$	0.67	%MS = 575,60* $e^{-0,38NDVI} - 437,68$	0.47	Quantité de MS disponible (t)
NDVI moyenne de la parcelle	<i>Stylosanthes CIAT 184</i>	20	MV = -4747,71* $e^{-0,48NDVI} + 4199,48$	0.62	%MS = 266,11* $e^{-0,29NDVI} - 173,97$	0.43	Coordonnées GSP (Degré décimal)
	<i>Brachiaria ruziziensis</i>	30	MV = -7066,37* $e^{-0,3NDVI} + 6566,83$	0.82	MS = -1141,06* $e^{-0,64NDVI} + 998,54$	0.73	Nb de têtes pouvant être alimentés à l'instant "t"
Type d'espèce animale	<i>Lolium perenne</i> (a)	15	MV = 60,62NDVI - 24,63	0.68	MS = 5,62NDVI - 2,18	0.52	Nb de têtes pouvant être alimentés/année
	<i>Pennisetum purpureum</i> (b)	17	MV = 0,034*e ^{5,418NDVI}	0.73	MS = 0,004*e ^{5,84NDVI}	0.68	Capacité de charge de la parcelle (UBT, UGB, /ha)
Taux d'utilisation du fourrage (c)	<i>Chloris gayana</i> (b)	17	MV = 0,045*e ^{5,011NDVI}	0.71	MS = 0,014*e ^{4,49NDVI}	0.59	Verte 3t(MS)/ha > Orange > Rouge 1,5t(MS)/ha

Andriarimalala, H. J. 2014. Étude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité par télédétection. Unpubl. MS thesis, Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques. Département Élevage. Disponible en ligne <http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/andriarimalalaHerilalaoJ_AGRO_M2_14.pdf>

Boudet, G. 1975. Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un pâturage naturel tropical. In: Inventaire et Cartographie des Pâturages Tropicaux Africains, Actes du Colloque de Bamako, Mali (3–8 mars 1975), pp 265–267. Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, Maison-Alfort, France. Disponible en ligne <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_06-07/08655.pdf>

Rahetlah, V. B., Salgado, P., Andrianarisoa, B., Tillard, E., Razafindrazaka, H., Le Mezo, L. & Ramalanjaona, V. L. 2014. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. Livestock Research for Rural Development 26, 5: #95. <<http://www.lrrd.org/lrrd26/5/rahe26095.html>>